

Rec 30 AUG 2004

10/547535
PCT/JP 2004/002749

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

04. 3. 2004

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日
Date of Application: 2 0 0 3 年 3 月 4 日

出 願 番 号
Application Number: 特 願 2 0 0 3 - 0 5 6 5 4 9
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 3 - 0 5 6 5 4 9]

出 願 人
Applicant(s): 日本板硝子株式会社

REC'D 22 APR 2004

WIPO

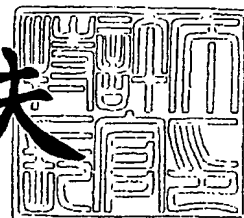
PCT

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2 0 0 4 年 4 月 8 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康 夫



出証番号 出証特 2 0 0 4 - 3 0 2 8 7 3 8

【書類名】 特許願
【整理番号】 02P571
【あて先】 特許庁長官 殿
【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜 4 丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子
株式会社内

【氏名】 橘高 重雄

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜 4 丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子
株式会社内

【氏名】 大家 和晃

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜 4 丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子
株式会社内

【氏名】 奈良 正俊

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜 4 丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子
株式会社内

【氏名】 常友 啓司

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜 4 丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子
株式会社内

【氏名】 浅井 貴弘

【特許出願人】

【識別番号】 000004008

【氏名又は名称】 日本板硝子株式会社

【代理人】

【識別番号】 100069084

【弁理士】

【氏名又は名称】 大野 精市

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 012298

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9706787

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 フォトニック結晶を用いた導波路素子およびフォトニック結晶ファイバ

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

2 方向以上に周期構造を有するフォトニック結晶からなるコアと、該コアに接し該コアを伝搬する電磁波を該コア内に閉じ込める作用をなすクラッドとを有し、前記電磁波の伝搬方向を前記周期構造が有する少なくとも 2 方向の周期性が存在する面に垂直な方向とする導波路素子であって、前記コアにおける前記周期構造が露出する端面を電磁波入射面とし、入射する電磁波は、前記コア部分におけるフォトニックバンド構造のブリルアンゾーン境界面上もしくはその近傍に属するバンドに結合して前記コア部分を伝搬することを特徴とするフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 2】

前記コアを伝搬する電磁波は、その全部もしくは大部分が単一のフォトニックバンドに属する波動であることを特徴とする請求項 1 に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 3】

前記フォトニック結晶は前記電磁波の伝搬方向には周期性を有さないことを特徴とする請求項 1 または 2 に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 4】

前記電磁波入射面に対して、傾き角を有する略平面波を入射させることを特徴とする請求項 1、2 または 3 に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 5】

前記電磁波入射面を該電磁波の伝搬方向に垂直な面から傾斜させ、略平面波を入射させることを特徴とする請求項 1、2 または 3 に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 6】

入射する電磁波は、前記電磁波入射面において、入射面と平行な面内方向に周

期的に位相変調されていることを特徴とする請求項 1、2 または 3 に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 7】

前記電磁波入射面に複数の略平面波を入射させ、該複数の略平面波を入射面において干渉させて位相変調を行うことを特徴とする請求項 6 に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 8】

前記電磁波入射面に近接または接触し、もしくは該電磁波入射面と一体化して位相格子を設け、該位相格子に略平面波を入射させることを特徴とする請求項 6 に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 9】

前記フォトニック結晶を伝搬した電磁波が同フォトニック結晶から出射される端面に近接または接触して、もしくは前記フォトニック結晶と一体化して、前記出射面と平行な方向に周期を有する位相変調手段を設け、出射する前記電磁波を略平面波に変換することを特徴とする請求項 1～8 のいずれか一項に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 10】

前記フォトニック結晶を伝搬した電磁波が同フォトニック結晶から出射される端面に近接または接触して、もしくは前記フォトニック結晶と一体化して設けた位相変調手段が、前記電磁波が入射する端面に近接または接触して、もしくは前記フォトニック結晶と一体化して設けた位相変調手段を逆向きにしたものであることを特徴とする請求項 9 に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 11】

電磁波の伝搬方向に垂直な少なくとも 1 方向に周期性を有するフォトニック結晶を前記クラッドとして用いることを特徴とする請求項 1、2 または 3 に記載の導波路素子。

【請求項 12】

電磁波の伝搬方向に垂直な少なくとも 1 方向に周期性を有し、伝搬方向には周期性を有さないフォトニック結晶を前記クラッドとして用いることを特徴とする

請求項 12 に記載の導波路素子。

【請求項 13】

前記フォトニック結晶からなるコアが、直交する X および Y 方向にそれぞれ周期 a_x 、 a_y を有し、X Y 平面に平行な前記フォトニック結晶の端面を電磁波入射面とし、前記 Y 方向に一定周期を有する多層膜層に対し、Y 方向を深さ方向とする複数の溝を、前記 X 方向に一定の間隔をもって平行に形成したことを特徴とする請求項 3 に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 14】

前記フォトニック結晶は、均質物質の 1 端面を X Y 平面とし、該平面に垂直な Z 方向に平行な複数の空孔を X および Y 方向に一定の周期をもって形成したことを特徴とする請求項 3 に記載のフォトニック結晶を用いた導波路素子。

【請求項 15】

請求項 14 に記載のフォトニック結晶をファイバ状均質物質の長手方向に垂直な断面内中央部に、該長手方向に沿って前記空孔の方向が一致するように設け、これをコアとしたことを特徴とするフォトニック結晶ファイバ。

【請求項 16】

前記複数の空孔の全部もしくは一部に流動性物質を充填したことを特徴とする請求項 16 に記載のフォトニック結晶ファイバ。

【請求項 17】

前記複数の空孔の全部もしくは一部に光学的非線形作用を有する活性物質を充填したことを特徴とする請求項 16 に記載のフォトニック結晶ファイバ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、フォトニック結晶構造により電磁波を制御する素子、特に光通信システム等に用いられる光導波路素子に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

近年、ホーリーファイバ、フォトニック結晶ファイバ (PCF)、あるいはフ

フォトニックバンドギャップファイバ (PBF) などと呼ばれる新しい光ファイバの研究開発が急速に進展している。従来の光ファイバでは単純な屈折率差によりコア部分に光を閉じ込めているのに対して、これらのファイバはその断面内に複雑な 2 次元構造を有することを特徴としている。

【0003】

そのため、光の閉じ込めは、

- ・クラッド部分に空孔を配置することにより実効屈折率を小さくして、コア部分との屈折率差をつける (ホーリーファイバ、PCF)、

- ・クラッド部分をフォトニック結晶として、コア部分の伝搬光に対してフォトニックバンドギャップを形成する (PBF)、

などの手段によって行なわれている。

【0004】

PCFやPBFでは、構造によってその特性を大きく変えることができるので、

- ・波長分散を大きくした分散補償光ファイバ
- ・非線形光学効果の大きい光ファイバ
- ・可視域でのゼロ分散光ファイバ

などの応用が提案されており、複雑な 2 次元構造は、たとえば多数の石英ガラスパイプを束ねた状態で加熱延伸することによってつくることができる (例えば、非特許文献 1 参照)。また、最近になってフォトニック結晶部分をコアとして利用するファイバも提案されている (例えば、非特許文献 2 参照)。

【0005】

このような現在提案されているほとんどの PCF や PBF では、コア部分を伝搬する電磁波として、0 次モードによる単一モード伝搬を利用している。単一モード伝搬は、多モード伝搬による波長分散を防ぐためには必須の条件であるものの、コアの大きさや光ファイバ性能に対する制約条件ともなっている。

【0006】

一方、フォトニック結晶内を伝搬する電磁波には、

- ・特異なバンド構造による非常に大きな波長分散

・伝搬光の群速度異常

という特徴的な性質があることはよく知られている。ところが、前記0次モードによる伝搬光は、上記の性質があまり強くない。したがって、上記の性質を利用した機能を発揮するためには導波路長を長くする必要があり、製作コストが増大するとともに伝搬中の損失が問題となってくる。

【0007】

本発明者らは、フォトニック結晶内部の電磁波伝搬について研究してきた。たとえば、伝搬方向に周期性のない1次元フォトニック結晶の端面に入射電磁波として平面波状の光を垂直に入射させると、入射光の周波数によっては複数のフォトニックバンドによる伝搬光が発生する。このうち、最低次ではないバンドによる伝搬光(以下、高次バンド伝搬光と呼ぶ)は、上述した非常に大きな波長分散や群速度以上といった特徴を有するので各種光学素子に応用することができる。

【0008】

【非特許文献1】

大橋正治、「通信用光ファイバの最新技術動向」、オー・プラス・イー、2001年、第23巻、第9号、p. 1061-1066

【非特許文献2】

J・C・ナイト (J.C.Knight)、外3名、オプティカル・ソサエティ・オブ・アメリカ、アニュアル・ミーティング・2002、コンファレンズ・プログラム (Optical Society of America Annual Meeting 2002, Conference Program)、2002年、(米国)、WA3、p. 94

【0009】

【発明が解決しようとする課題】

しかし、周波数にかかわらず入射光のエネルギーの一部は必ず最低次のバンド(従来の光ファイバにおいては0次モードに相当する)による伝搬光(以下、第1バンド伝搬光と呼ぶ)となって伝搬する。第1バンド伝搬光は上述した「非常に大きい波長分散」、「群速度異常」といった効果がほとんどないので、高次バンド伝搬光を利用する場合には単なるノイズでしかなく、入射光エネルギーの利用効率を大きく低下させてしまうのみならず、迷光として導波路のS/N比を低下

させる原因となっている。

【0010】

本発明は上記の課題を解決するためになされたもので、フォトニック結晶に特有の効果を十分に発揮するように構成された導波路素子あるいはファイバを提供することを目的とする。

【0011】

【課題を解決するための手段】

上記課題に対する本発明者らの研究により、入射光に1次元フォトニック結晶の端面と同じ周期の位相変調を加えることによって、単一の高次バンドによる伝搬光を得ることができることが明らかになった。位相変調は、たとえば平面波を位相格子に通すという簡便な方法によって実現することができる。上記の方法を2次元フォトニック結晶に拡張した導波路は、フォトニック結晶部分をコアとする光ファイバとなる。

【0012】

本発明では、断面(XY面)内の2方向以上に周期を有するフォトニック結晶をコアとする導波路構造において、入射光に位相変調を加えることにより、Z方向に伝搬するフォトニックバンドを利用する。その際に、とくにブリルアンゾーン境界線上に存在するバンドを積極的に利用することを特徴とする。

ブリルアンゾーン境界では、最低次のバンドであっても上述した高次バンド伝搬光と同様な特徴を有するので、各種光学素子として利用することができる。

【0013】

上記作用は、以下の手段により達成される。

本発明の導波路素子は、2方向以上に周期構造を有するフォトニック結晶からなるコアと、このコアに接しコアを伝搬する電磁波をコア内に閉じ込める作用をなすクラッドとを有し、伝搬する電磁波の伝搬方向を上記周期構造が有する少なくとも2方向の周期性が存在する面に垂直な方向とする。このような導波路素子のコア部分の周期構造が露出する端面を電磁波入射面とし、入射する電磁波は、コア部分におけるフォトニックバンド構造のブリルアンゾーン境界面上もしくはその近傍に属するバンドに結合してコア部分を伝搬させるものとする。

【0014】

上記のコアを伝搬する電磁波は、その全部もしくは大部分が単一のフォトニックバンドに属する波動であることが望ましい。また、このフォトニック結晶は電磁波の伝搬方向には周期性を有さないことが望ましい。

なお、入射する電磁波を略平面波とし、電磁波入射面に対して、傾き角を有する方向から入射するか、または電磁波入射面をフォトニック結晶内の電磁波の伝搬方向に垂直な面から傾斜させることが望ましい。これによってフォトニック結晶内を伝搬する電磁波はブリルアンゾーン境界線近傍のバンドを利用することができる。

【0015】

さらに、入射する電磁波は、電磁波入射面において、入射面と平行な面内方向に周期的に位相変調されていることが望ましい。そのために、電磁波入射面に近接または接触し、もしくは電磁波入射面と一体化して位相格子を設け、この位相格子に略平面波を入射させる。これによって入射電磁波を位相変調してフォトニック結晶に入射することができる。

【0016】

また、フォトニック結晶を伝搬した電磁波が同フォトニック結晶から出射される端面に近接または接触して、もしくはフォトニック結晶と一体化して、フォトニック結晶が有する周期と同一方向に同一周期を有する位相変調手段を設ける。これによって出射する電磁波を略平面波に変換することができる。この手段は、電磁波が入射する端面に設けた位相変調手段を逆向きにしたものとすることによって実現できる。

【0017】

導波路素子のクラッドには、電磁波の伝搬方向に垂直な面内に、少なくとも1方向に周期性を有するフォトニック結晶を用いるのが望ましい。このクラッドは、電磁波の伝搬方向に垂直な面内に、少なくとも1方向に周期性を有し、伝搬方向には周期性を有さないフォトニック結晶であることが好ましい。

【0018】

本発明の導波路素子は、フォトニック結晶からなるコアが、直交するXおよび

Y方向にそれぞれ周期 a_x 、 a_y を有し、XY平面に平行なフォトニック結晶の端面を電磁波入射面とし、Y方向に一定周期を有する多層膜層に対し、Y方向を深さ方向とする複数の溝を、X方向に一定の間隔をもって平行に形成したフォトニック結晶をコアとすることによって実現できる。

【0019】

あるいは均質物質の1端面をXY平面とし、この平面に垂直なZ方向に平行な複数の空孔をXおよびY方向に一定の周期をもって形成したフォトニック結晶をコアとすることもできる。このフォトニック結晶をファイバ状均質物質の長手方向に垂直な断面内中央部に、その長手方向に沿って空孔の方向が一致するように設けることにより、このフォトニック結晶をコアとしたフォトニック結晶ファイバが形成できる。

【0020】

このフォトニック結晶ファイバは、その空孔部分の全部もしくは一部に流動性物質を充填することもでき、また光学的非線形作用を有する活性物質を充填することもできる。

【0021】

【発明の実施の形態】

本発明者らの研究により、Y軸方向に周期性があり、X軸およびZ軸方向に周期構造のない1次元フォトニック結晶の場合には、「周期 a の多層膜層に対して、同じ方向に周期 a を有する適当な位相変調波を入射させると、特定の高次バンドに属する伝搬光のみを得ることができる」ということが明らかになっている。また、光路を逆に考えると、高次バンド伝搬光が多層膜層の端面から出射された後に適当な位相変調手段を設置することにより平面波に戻すこともできる。位相変調波により高次バンド伝搬光のみをフォトニック結晶中に伝搬させる方法について、つぎに説明する。

【0022】

図1は、物質AとBを周期 a で重ね合わせた周期的多層膜（1次元フォトニック結晶）1内での、Z方向における第1バンド伝搬光と高次バンド伝搬光の電場の強さを模式的に表わしたものである。電場の山は実線、谷は点線で表わし、線

の太さは振幅の大きさを表わすものとする。

【0023】

第1バンド伝搬光は、図1(a)に示すように電場の振幅は媒体A内と媒体B内で異なるものの、電場の山と谷はそれぞれZ軸と垂直な平面となるので、平面波に近い伝搬となる。

【0024】

しかし、高次バンド伝搬光は、図1(b)に示すように電場振幅が0となる「節」が生じ、1周期は2つの領域に分割される。隣り合う領域では波動の位相が半波長ずれているため、山と谷が入れ違いに現われる。図示はしていないが、さらに高次のバンドによる伝播光では1周期内の節の数が増えて、1周期内での半波長ズレが何回も起こるようになる。したがって、第1バンドと高次バンドがともに関与する波長の入射光に対する伝搬光は両者が重なって、複雑な電場パターンを示すことになる。

【0025】

ところで、図2に示すように、Y方向に周期aで半波長差を生じる位相変調手段としての位相格子6に平面波3を入射させると、図1(b)における高次バンド伝搬光に類似した電場パターンを空間12に作ることができる。この空間12の位置に周期的多層膜層（フォトリック結晶）1の端面を置くと、第1バンド伝搬光は発生せず、高次バンド伝搬光のみが生じることが、本発明者らのシミュレーションにより明らかとなった。

【0026】

また、光路を逆に考えると、高次バンド伝搬光が多層膜層の端面から出射された後に適当な位相変調手段を設置することにより平面波に戻すこともできることがわかる。

【0027】

また、ブリルアンゾーン境界上のバンドを用いる伝搬に対しては、「周期aの1次元フォトリック結晶（周期的多層膜）に対して、同じ方向に周期2aを有する適当な位相変調波を入射させると、特定の高次バンドに属する伝搬光のみを得ることができる」ということも明らかになっている。

【0028】

本発明では、上述した「伝搬方向に周期性を有さない1次元フォトニック結晶」による、ブリルアンゾーン境界線上のバンドによる伝搬と位相変調を組合わせた手法を、2次元あるいはそれ以上のフォトニック結晶に拡張する。

【0029】

以下、本発明の実施の形態について具体的に説明する。

図3は、X軸方向およびY軸方向に周期性を有し、Z軸方向には周期性のない2次元フォトニック結晶2を模式的に示したものである。円筒部分(媒質A)は、半径R、屈折率 n_A の形状が周期aの正方形配列をなしており、円筒以外の部分の媒質Bは屈折率 n_B とする。

【0030】

図3において、フォトニック結晶2の端面2aから真空中の波長 λ_0 の平面波を入射させたとき、この光が多層膜内でどのように伝搬するかは、フォトニックバンドを計算し図示することにより知ることができる。バンド計算の方法は、例えば“Photonic Crystals”, Princeton University Press (1995) あるいは、Physical Review B 44巻、16号、p.8565、1991年、などに詳しく述べられている。

【0031】

バンド計算に際しては、図3に示すフォトニック結晶2はX方向およびY方向には無限に続く周期構造を有し、Z方向には無限に広がっているものと仮定する。図4は、

$$\text{屈折率 } n_A = 1.00 \quad R = 0.30a$$

$$\text{屈折率 } n_B = 1.45$$

の場合について、XY平面におけるバンド計算(平面波法)の結果を、TE偏光の第1、第2、第3バンドについて第1ブリルアンゾーンの半分(Y方向の上半分)の範囲内で示したものであり、Y方向の下半分は上半分と対称である。

【0032】

バンド図は規格化周波数

$$\omega a / 2\pi c$$

が同じ値となる点を結ぶことによって等高線状となり、図中の添字は $\omega a / 2\pi$

c の値を意味する。ここで、 ω は入射する光の角振動数、 a は構造の周期、 c は真空中での光速である。

【0033】

規格化周波数は、真空中の入射光波長 λ_0 を用いて、 a/λ_0 と表わすことができるので、以下では a/λ_0 と記述する。ブリルアンゾーンの X 軸および Y 軸方向の幅は $2\pi/a$ である。TE 偏光は電場の向きが X 軸方向である偏光を表わす。図 3 の場合については、対称性から TM 偏光（磁場の向きが X 軸方向）のバンド図が同じ形状となることは明らかである。

【0034】

また、フォトリックバンド構造は Z 軸方向にも広がっており、図 5 に模式的に示すように、 a/λ_0 値に対して「等高面」の形状となる。 Z 軸方向には周期性がないのでブリルアンゾーンの境界が存在せず、どこまでも広がっている。

このような図 3 に示すフォトリック結晶 2 の垂直端面 $2a$ に平面波を入射させた場合について、フォトリック結晶内での伝搬光を考える。

【0035】

図 6 は、規格化周波数 a/λ_0 の平面波を、端面 (XY 平面と平行) から斜めに入射させた場合の伝搬をバンド図上であらわした模式図である。単純化のために、入射光の傾きは YZ 平面内に限られるものとする。入射側の均質物質の屈折率を n とすると、均質媒体のバンド図は

$$\text{半径} = n \cdot (a/\lambda_0), \quad (\text{単位は } 2\pi/a)$$

の球となるので、作図によってフォトリック結晶側の結合バンドを求めることができる。図 6 においては第 1 および第 2 バンド上に対応点があるので、フォトリック結晶内ではそれぞれのバンドに対応した電磁波が伝搬することになる。また、エネルギーの進行方向は等高面の法線方向となる。

【0036】

図 5、図 6 より、伝搬する電磁波エネルギーの進行方向を Z 軸と平行するには、等高面の傾斜が XY 平面と平行となる点を伝搬に用いる必要があることがわかる。そのような点は、対称性から図 7 に示すように、ブリルアンゾーン内の A 、 $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 、 $B4$ 、 $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 、 $C4$ の各線上に存在する。本発明

では、この中でもブリルアンゾーン境界面上にある B 1、B 2、B 3、B 4、C 1、C 2、C 3、C 4 による伝搬を利用する。

【0037】

たとえば、B 1 線上の点に対応する入射平面波の波数ベクトルは、

$$k_1 = (kx_1, ky_1, kz_1)$$

$$kx_1 = \pi / a$$

$$ky_1 = \pi / a$$

$$kz_1 = kz \quad (\text{正の実数})$$

となる。平面波の真空における波長 λ_0 は、

$$\lambda_0 = 2\pi n / (kx_1^2 + ky_1^2 + kz_1^2)^{0.5}$$

により計算することができる。ここで、B 1 線上に

$$a / \lambda_0$$

に相当するバンドが存在するように、 kz の値はある程度大きくする必要がある。

【0038】

すなわち、フォトニック結晶の端面 (XY 平面) に対して、特定の入射角を有する平面波を入射させれば、XY 平面上において電磁波の位相が周期的に変化するので、ブリルアンゾーン境界面上のバンドによる伝搬を実現することができる。また、同様な効果は、入射端面を XY 平面に対して傾けることによっても得ることができる。

【0039】

(複数の平面波による干渉の利用)

波数ベクトル k_1 に相当する平面波だけを入射させると、B 1 線上にある複数のバンドによる伝搬が同時に起こったり、端面での反射損失が大きくなったりすることがある。したがって、単一のバンドによる伝搬を効率よく起こすためには、B 2、B 3、B 4 線上に相当する平面波

$$k_2 = (kx_2, ky_2, kz_2)$$

$$kx_2 = -\pi / a$$

$$ky_2 = \pi / a$$

$$kz_2 = kz$$

$$k_3 = (k_{x3}, k_{y3}, k_{z3})$$

$$k_{x3} = -\pi / a$$

$$k_{y3} = -\pi / a$$

$$k_{z3} = k_z$$

$$k_4 = (k_{x4}, k_{y4}, k_{z4})$$

$$k_{x4} = \pi / a$$

$$k_{y4} = -\pi / a$$

$$k_{z4} = k_z$$

も組み合わせれば良い。

【0040】

ただし、各平面波の進行方向が同じままで入射光の波長を変えると上記の数式が完全には成り立たなくなるので、エネルギー伝搬の方向もZ軸からずれてしまい、光学素子としての特性が維持できる波長域に制限が生じることもある。

【0041】

図7におけるC1、C2、C3、C4線の組も、B1、B2、B3、B4線と同様に利用することができる。また、A線（Z軸と一致）は、垂直入射する平面波に対応する。ただし、上述したように、A線上の第1バンドは波長分散や群速度異常などの特性が弱い、という問題点がある。

【0042】

（位相格子の利用）

図8に示すように、複数の方向（X軸とY軸をそれぞれ45°回転させた方向）に周期性を有する位相格子に、平面波を垂直入射させると、回折光の干渉により第1の方法による k_1 , k_2 , k_3 , k_4 に相当する回折波を発生させることができる。したがって、位相格子の直後にフォトニック結晶の端面を設置すれば、B1、B2、B3、B4線上のZ軸方向の伝搬光を得ることができる。位相格子による余分な回折光が混入するとフォトニック結晶の特定バンドと効果的に結合しないので、必要な回折光ができるだけ強くなるように最適化した形状であることが望ましい。

【0043】

また、特定の波長で最適化した位相格子は、入射する平面波の波長が多少変わっても 1 次回折光の効率に急激に低下せず、高いレベルに留まるので、本方法は使用できる波長域を広くとることができる。もちろん、位相格子の形状や周期を最適化すれば、図 5 における C 1、C 2、C 3、C 4 線の組に対応した波面とすることができる。

【0044】

上述した方法以外にも、

- ・位相格子に対して、平面波を斜めに入射させる
- ・入射端面自体に加工して位相格子の機能を持たせる

などの方法を単独もしくは組み合わせて位相変調を行なうこともできる。

【0045】

(出射端面の位相変調)

フォトニック結晶導波路の出射面は、そのままであると著しい回折が生じるが、位相変調を加えると平面波状の出射光を得ることができる。位相変調の方法としては、たとえば上述の位相格子をそのまま逆向きに設置すればよい。入射側と出射側の両方に同じ位相格子を対称に設置すれば、どちらの方向の伝搬光に対しても同じ作用となるので、両端に光ファイバなどをそのまま結合させることができる。

【0046】

以上述べた方法により、フォトニック結晶内に高次バンド伝搬光を効率よく形成することができるが、実際に光学素子を設計する場合は、図 9 に模式的に示すような平面基板上の導波路、あるいは後述の図 13 に示すような光ファイバ形状とすることが好ましい。

【0047】

(平板上の導波路素子)

図 9 (a) は、2 次元フォトニック結晶を用いた導波路状素子の模式図であり、図 9 (b) はその導波路部分の断面 (X Y 方向) の模式図である。光ファイバなどからの入射光 4 は、集光レンズ 5 a により集光され、ビームウエスト位置に位相格子 6 a が設置してある。位相格子 6 a によって位相変調された入射光は、そ

のままフォトニック結晶導波路 7 に結合して、特定の高次バンド伝搬光となる。

【0048】

導波路のコア部分の上下 (Y 方向) 左右 (X 方向) は、コア部分とは周期もしくは材質の異なるフォトニック結晶層からなるクラッド層が存在し、これにより伝搬光は閉じ込められている。

伝搬光は、出射側の位相格子 6 b によって再び平面波に変換されてから、集光レンズ 6 b によって出射光 8 となり、光ファイバ等に結合する。

【0049】

高次バンド伝搬光は前述したように入射光の波長によって群速度が大きく変化するので、このような構成のままであっても

- ・光通信用信号光の分散補償
- ・光遅延素子

などの用途に用いることができる。

【0050】

また、前述したように群速度の遅い伝搬光には非線形光学効果を増強する作用があるので、

- ・フォトニック結晶導波路部分に、非線形光学作用を示す物質を微粒子状にしてドープする、
 - ・フォトニック結晶導波路部分の 1 周期ごとに、非線形光学作用を示す物質を含む薄膜層を設置する、
 - ・フォトニック結晶導波路を形成する物質そのものを、非線型作用のあるものとする、
- などの手段により、従来あるものよりもはるかに非線形光学効果の大きい導波路状の光学素子を実現することができる。

【0051】

このようなフォトニック結晶構造は、たとえば図 9 (b) に示すように、

- (イ) 基板 9 上に周期的多層膜を成膜する、
- (ロ) 多層膜の表面に、縞状パターンのマスクをつける、
- (ハ) エッチングにより、多層膜部分に深い溝 18 を形成して 2 次元フォ

トニック結晶とする、

などの方法により形成することができる。ここで、

- ・ Y 軸方向に積層する多層膜の材質や膜厚のパターン
- ・ 深い溝の幅と周期のパターン

を変化させることにより、図 9 (b) のような形状とすることもできる。

【0052】

上述した製法では、コア部分の x y 平面 (x 方向の周期 a_x 、 y 方向の周期 a_y) でのブリルアンゾーン形状は、一般的に図 10 に示すような長方形となる。この場合は、入射する平面波の組み合わせとしては、B 1、B 2、B 3、B 4 線上に相当する

$$k_1 = (kx_1, ky_1, kz_1)$$

$$kx_1 = \pi / a_x$$

$$ky_1 = \pi / a_y$$

$$kz_1 = kz$$

$$k_2 = (kx_2, ky_2, kz_2)$$

$$kx_2 = \pi / a_x$$

$$ky_2 = \pi / a_y$$

$$kz_2 = kz$$

$$k_3 = (kx_3, ky_3, kz_3)$$

$$kx_3 = -\pi / a_x$$

$$ky_3 = -\pi / a_y$$

$$kz_3 = kz$$

$$k_4 = (kx_4, ky_4, kz_4)$$

$$kx_4 = \pi / a_x$$

$$ky_4 = -\pi / a_y$$

$$kz_4 = kz$$

を選ぶことができる。ただし、 kz は真空中の波長を λ_0 として、

$$\lambda_0 = 2\pi n / (kx_1^2 + ky_1^2 + kz_1^2)^{0.5}$$

により計算することができる。

【0053】

また、 C_{x1} 、 C_{x2} 線上に相当する平面波の場合は

$$k_1 = (k_{x1}, k_{y1}, k_{z1})$$

$$k_{x1} = \pi / a_x$$

$$k_{y1} = 0$$

$$k_{z1} = k_z$$

$$k_2 = (k_{x2}, k_{y2}, k_{z2})$$

$$k_{x2} = -\pi / a_x$$

$$k_{y2} = 0$$

$$k_{z2} = k_z$$

となる。

【0054】

同様に、 C_{y1} 、 C_{y2} 線上に相当する平面波の場合は

$$k_1 = (k_{x1}, k_{y1}, k_{z1})$$

$$k_{x1} = 0$$

$$k_{y1} = \pi / a_y$$

$$k_{z1} = k_z$$

$$k_2 = (k_{x2}, k_{y2}, k_{z2})$$

$$k_{x2} = 0$$

$$k_{y2} = -\pi / a_y$$

$$k_{z2} = k_z$$

となる。 k_z の値の計算方法は上記のものと同一である。

【0055】

これらの導波路構造を実用化するためには、X軸方向およびY軸方向への、光の閉じ込めが不可欠である。

フォトニック結晶内を伝搬する高次バンド伝搬光（角周波数 ω ）の、フォトニック結晶内での周期を λ とする。角周波数 ω の電磁波の真空中における周期は $\lambda_0 = 2\pi c / \omega$ であることから、 λ_0 / λ の値を実効屈折率と定義する。伝搬光の側面に接する媒体の屈折率を n として、

$$\lambda_0/\lambda > n$$

の条件が満たされると、伝搬光は媒体側に波面を作り漏れ出すことができないので、フォトニック結晶内に閉じ込めることができる。

【0056】

しかし、フォトニックバンドの特異な形状によって、実行屈折率が1未満となることもあり、そのような場合は外側の媒体を真空としても閉じ込めができない。そこで、伝搬光の逃げ出しを防いで閉じ込めるためには、たとえば図11に示すようにフォトニック結晶1の周囲に金属膜などの反射層15を設ければよい。

しかし、反射層による多層膜強度の低下や反射率の不足による減衰等の問題がある場合は、図9(b)に示すように、周期あるいは構造の異なるフォトニック結晶により閉じ込めを実現することができる。すなわち、コアとしてはたらくフォトニック結晶16の周囲を周期の異なるフォトニック結晶17a、17b、17cで囲むようにすることにより、伝搬光をコア部分に閉じ込めることができる。

【0057】

図12は、互いに隣接するフォトニック結晶 α とフォトニック結晶 β のYZ平面におけるバンド図を、波長 λ_0 に対して模式的に示したものである。結晶 α の内部には、ブリルアンゾーン境界におけるZ方向の伝搬光(第1バンドによる)が伝搬しているものとする。フォトニック結晶 β においては、Z方向にバンドの存在しない領域(バンドギャップ)が生じており、結晶 α 内部の伝搬に対応するバンドが存在しない。従って、結晶 α の伝搬光は結晶 β に結合せず、閉じ込めがなされていることになる。

【0058】

閉じ込め用フォトニック結晶の材料や構造は、伝搬用フォトニック結晶と異なったものであっても構わないが、多層膜の作製の手間を考えれば同じ材料を用いて周期を変えることが望ましい。図9(b)の断面図は、コアとなる2次元フォトニック結晶16の周囲を、

上側：コア部分と多層膜の構成と周期の異なる2次元フォトニック結晶17a

左右：コア部分と空気溝の幅と周期の異なる2次元フォトニック結晶17b

下側：コア部分と多層膜の構成と周期の異なる 1 次元フォトニック結晶 17 c により囲んで閉じ込めた例である。もちろん、結晶 α 側で使用する波長域と伝搬バンドにおいて伝搬光の波数ベクトルに対応するバンドが結晶 β 側に存在しないことは、バンド計算によって確認して設計する必要がある。

【0059】

バンド図による閉じ込めの判定は、無限周期構造を前提としたものであるから、閉じ込め用フォトニック結晶の周期数がたとえば 3 周期くらいであると、閉じ込めが不十分となり伝搬光が外部に漏れてしまうことがある。もちろん、不必要に周期数を多くすることはコストと多層膜の耐久性や精度の点から好ましくない。実際に必要な最低限の周期数は、実験や電磁波シミュレーションにより決定することが望ましい。

【0060】

また、本発明者らのシミュレーションによると、高次バンド伝搬光は電場の山と谷が互い違いになって進行するので、表面からの波面を作りにくく、漏れにくいという特徴がある。従って、導波路の側面を空気層などの均質物質に直接接触させる方法も用いることができる。

【0061】

(フォトニック結晶ファイバ)

本発明は、光ファイバにも応用することができる。

基本的な 2 次元フォトニック結晶光ファイバの模式図を図 13 に示す。円筒状の光ファイバ 10 は、その中心軸の周りに 2 次元周期構造を有するコア部 11 を有し、その周囲を周期性のないクラッド部分が囲んでいる。

【0062】

図 14 (a) は、本発明によるフォトニック結晶光ファイバの模式図である。光ファイバ本体 10 は、2 次元周期構造を有するコア部 11 と、その周囲のクラッド部分 14 から構成される。光ファイバ 10 の両端には、位相格子 26 a、26 b がそれぞれ設置されており、入射光（平面波、図示しない）はコア部分を高次バンド光として伝搬し、出射端で再び平面波に復元される。両端の位相格子は同じものなので、どちらの方向にも用いることができる。

【0063】

クラッド部14のフォトニック結晶は、コア部11のフォトニック結晶と異なる周期や構造を有し、コア部分の伝搬光をフォトニックバンドギャップによって閉じ込める役割をなす。

【0064】

また、図14(b)に示すように、クラッド部24は、半径方向に周期性を有する同心円状のフォトニック結晶構造としても良い。このようなクラッド構造は、たとえば文献、Photonics West 2003 Technical summary digest、p.383、講演番号C4993-04、に提案されているように、屈折率の異なる2層からなる薄膜を巻きつけてから固定し、紡糸して延伸する、といった方法によって作製することができる。この場合の構造は、正確には同心円ではなく螺旋状となるが、閉じ込めの効果は充分に発揮できる。なお、図14(b)の例では位相変調手段の図示を省略している。

【0065】

本光ファイバの伝搬光は高次バンドによるものなので、最低次バンドによる単一モード伝搬を用いる従来の光ファイバよりもはるかに大きい群速度異常が発生する。したがって、強力な分散補償効果や非線形光学効果を発揮することができる。

【0066】

また、コア部分は周期構造であり大きさに制限がないので、大口径のコアを容易に実現することができ、ファイバ間接続を簡略にすることもできる。

この場合のフォトニック結晶は、ファイバ状均質物質内に、その長手方向に沿って複数の空洞を設け、その複数の空洞を長手方向に平行な軸に対して対称な周期性をもって配置することによって実現することができる。この空洞部分の全部もしくは一部に流動性物質を充填することも可能である。

【0067】

また、高次伝搬バンドによる伝搬光ではいわゆる「フォトニック結晶における群速度異常」が生じるため、非線形光学効果の増強作用を起こすことなどが期待されている。本発明では群速度異常がほとんど起こらない第1バンド光にエネルギー

ギーを取られることがないので、たとえば多層膜やフォトニック結晶光ファイバのコア部分に非線形光学物質を含ませることによってより大きい光学的非線形性の増強効果を得ることができる（例えば、Optical Fiber Communication 2002/Conference and Exhibit Technical Digest、ThK4、p.468、参照）。

【0068】

フォトニック結晶ファイバとして作りやすい三角配列の場合、XY平面内でのブリルアンゾーン形状は、図15に示すような六角形となる。この場合は、入射する平面波の組み合わせとしては、たとえばB1、B2、B3、B4、B5、B6線上に相当する平面波の重ね合わせ、もしくはC1～C6線上に相当する平面波の重ね合わせとすればよい。

【0069】

（その他の条件）

本発明に用いる周期的多層膜の材料としては、使用波長域における透明性が確保できるものであれば特に限定はないが、一般的に多層膜の材料として用いられていて耐久性や製膜コストの点で優れたシリカ、シリコン、酸化チタン、酸化タantal、酸化ニオブ、フッ化マグネシウム、窒化シリコンなどが適する材料である。上記材料は、スパッタリング、真空蒸着、イオンアシスト蒸着、プラズマCVDなどの良く知られた方法により、容易に多層膜とすることができる。基板を用いず、多層膜層だけから構成される、いわゆるエアーブリッジ構造としてもよい。

【0070】

フォトニック結晶を構成する複数の材料間の屈折率比は大きくなるほど、波長分散なども大きくなる傾向があるので、そのような特性が必要な用途に対しては高屈折率材料と低屈折率材料を組合せることが望ましい。実用的に実現できる屈折率比は、たとえば低屈折率材料として空気（屈折率1）、高屈折率材料としてInSb（屈折率 $n=4.21$ ）を用いると4以上にすることができる（「微小光学ハンドブック」、朝倉書店、1995年、p.224、参照）。

【0071】

フォトニック結晶ファイバとする場合は、石英ガラスパイプを束ねて紡糸する

という一般的に良く知られた方法を用いることができる。この場合は、石英と空気孔の組み合わせとなるが、十分な効果を得ることができる。

【0072】

フォトニック結晶を構成する材料の屈折率比が小さくなると、偏光方向による特性の違いが小さくなる傾向があるので、偏波無依存を実現するためには屈折率比の小さい組合せも有用である。

基板を用いず、多層膜層だけから構成される、いわゆるエアーブリッジ構造としてもよい。

【0073】

材料を適切に選定すれば、本発明の作用は通常使用される $200\text{ nm} \sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 程度の波長範囲の光素子で特に発揮される。しかしながら、フォトニック結晶の原理は電磁波一般に適用できるものなので、本発明の構成をより波長の長い電波や、波長の短いX線やガンマ線に応用することもできる。

【0074】

本発明において、電磁波の伝搬方向の周期性は必要条件ではないが、たとえば伝搬方向にわずかな屈折率差のあるブラッグ回折格子を設けて、特定の波長のみ反射させる、といった応用も可能である。

【0075】

[計算例]

図3の構造の端面に平面波を入射させた場合について、以下の条件での電磁波シミュレーション(有限要素法)を実施した。以下の計算例では、長さはすべて多層膜層の周期 a を基準として規格化している。

【0076】

(1) フォトニック結晶の構造

媒体Aの中に、媒体Bの円柱空孔を正方形配列したもの。

(媒体A) 屈折率 $n_A = 1.45$

(媒体B) 屈折率 $n_B = 1.00$ 、半径 $0.3a$ の円柱形状

円柱の中心の座標は、 $(x, y) = (pa, qa)$ 、 p, q は整数
フォトニックバンド図 (TE偏光) は図4に示すものと同じである。

【 0 0 7 7 】

(2) 入射光

(真空中の波長) $\lambda_0 = a$ ($a / \lambda_0 = 1.00$)

図 5 における B1、B 2、B 3、B 4 上の点に対応する平面波として、波数ベクトル

$$k_1 = (kx_1, ky_1, kz_1)$$

$$kx_1 = \pi / a$$

$$ky_1 = \pi / a$$

$$kz_1 = kz$$

$$k_2 = (kx_2, ky_2, kz_2)$$

$$kx_2 = -\pi / a$$

$$ky_2 = \pi / a$$

$$kz_2 = kz$$

$$k_3 = (kx_3, ky_3, kz_3)$$

$$kx_3 = \pi / a$$

$$ky_3 = -\pi / a$$

$$kz_3 = kz$$

$$k_4 = (kx_4, ky_4, kz_4)$$

$$kx_4 = -\pi / a$$

$$ky_4 = -\pi / a$$

$$kz_4 = kz$$

を設定した。 kz の値は、 $\lambda_0 = 2\pi / (kx_1^2 + ky_1^2 + kz^2)^{0.5}$ の関係より求めた。入射側の屈折率 n は 1 としている。

【 0 0 7 8 】

入射する平面波は、互いに振幅と位相のそろった

$$A \cdot \exp(i\omega t) \exp(-ik_1 \cdot r)$$

$$A \cdot \exp(i\omega t) \exp(-ik_2 \cdot r)$$

$$A \cdot \exp(i\omega t) \exp(-ik_3 \cdot r)$$

$$A \cdot \exp(i\omega t) \exp(-ik_4 \cdot r)$$

である。ただし、 A は振幅、 i は虚数単位、 ω は角周波数、 $r = (x, y, z)$ は位置をあらわすベクトルである。

【0079】

(3) シミュレーション

フォトリソグラフィ装置の伝搬を、有限要素法によりシミュレーションした結果を以下に示す。使用したソフトウェアは日本総合研究所製のJ MAGである。

計算モデルは図16のようにXY方向へ無限に広がったものであるが、実際の計算では図17に示すように入射平面波の1周期部分のみ計算した。周期的境界条件を設定しているので、無限周期構造と等価になる。入射端面では、上記の4波長を重ね合わせて $z = 0$ とおいた式

$$E = 2A \cos(\omega t) \{ \cos(\pi x/2 + \pi y/2) + \cos(\pi x/2 - \pi y/2) \}$$

に従った電場 E の変調を境界条件として設定した。

【0080】

シミュレーション結果として、電場の強度分布を図17に示す。黒い部分は電場が強く、Tは電場の山、Bは谷を意味する。図17の電場パターンは、

- ・ XY平面上では中央の円柱が電場の山、四隅の円柱が谷となる。
- ・ 電場は媒体Aの円柱部分に局在し、媒体Bの部分では弱くなる。
- ・ 隣り合う円柱では、位相は半周期ずれる。

という特徴があり、高次バンドによる伝搬であることがわかる。

【0081】

[比較例]

計算例と同じモデルを用い、入射光をZ軸方向の単一な平面波とした場合のシミュレーションを行なった。入射端面の電場は

$$E = 2A \cos(\omega t)$$

であり、XY平面上で一様になる。

【0082】

シミュレーション結果として、電場の強度分布を図18に示す。電場パターンは複雑なものとなり、複数のバンドによる伝搬が重なっていることを示している。

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、フォトニック結晶中の高次バンド伝搬光を利用した光導波路型素子をつくることができる。したがって、高次バンド伝搬光の群速度異常に起因する分散補償、光学非線形性の増強効果などを利用した光学素子として広く応用することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 1次元フォトニック結晶内での、Z方向における（a）第1バンド伝搬光と（b）高次バンド伝搬光の電場の強さを示す模式図である。

【図 2】 位相変調手段による高次バンド光のみの発生を説明する図である。

【図 3】 2次元フォトニック結晶を示す模式図である。

【図 4】 2次元フォトニック結晶のXY方向フォトニックバンド構造を示す図である。

【図 5】 2次元フォトニック結晶の、Z方向におけるフォトニックバンドの広がりを示す模式図である。

【図 6】 2次元フォトニック結晶のXY端面に斜め入射した入射光と、フォトニックバンドとの結合を示す説明図である。

【図 7】 正形状の周期をXY方向に有するフォトニック結晶のフォトニックバンドについて、対称性の良い部分を示す説明図である。

【図 8】 4方向に回折波を生じる位相格子の模式図である。

【図 9】 基板上に作製したフォトニック結晶導波路素子の模式図である。

【図 10】 基板上に作製した2次元フォトニック結晶導波路の一例を示す図である。

【図 11】 長形状の周期をXY方向に有するフォトニック結晶のフォトニックバンドについて、対称性の良い部分を示す説明図である。

【図 12】 フォトニック結晶クラッドによるY方向への閉じ込めを説明する図である。

【図 13】 フォトニック結晶をコアとするフォトニック結晶ファイバの模式図である。

【図 14】 フォトニック結晶をコアおよびクラッドとして、両端に位相格子を

設置したフォトニック結晶ファイバの模式図である。

【図 15】 正三角形状の周期を X Y 方向に有するフォトニック結晶のフォトニックバンドについて、対称性の良い部分を示す説明図である。

【図 16】 計算例 1 のシミュレーションに用いた 2 次元フォトニック結晶の斜視図である。

【図 17】 計算例 1 のシミュレーションによる、電場強度パターンを示す図である。

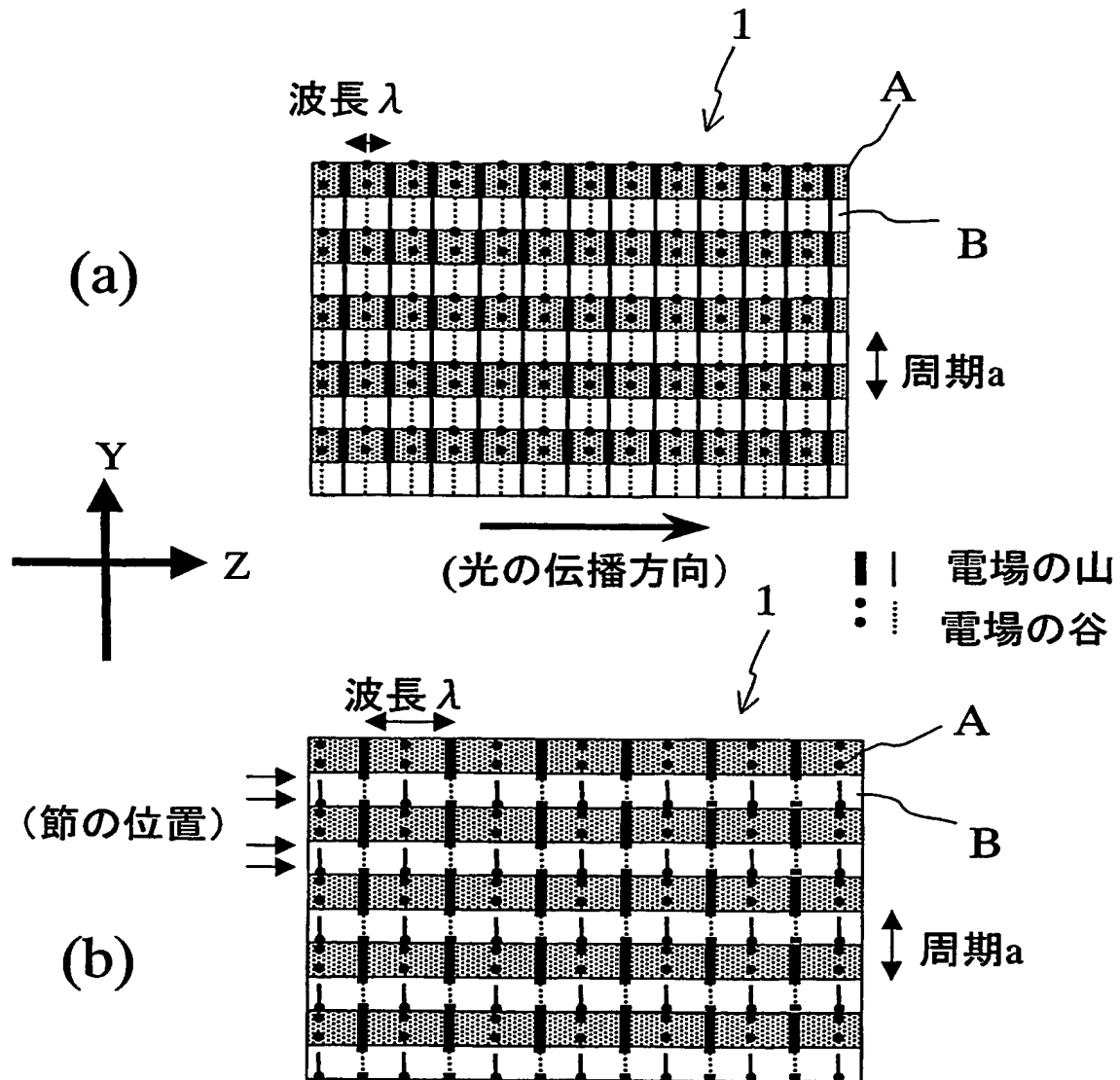
【図 18】 比較例のシミュレーションによる、電場強度パターンを示す図である。

【符号の説明】

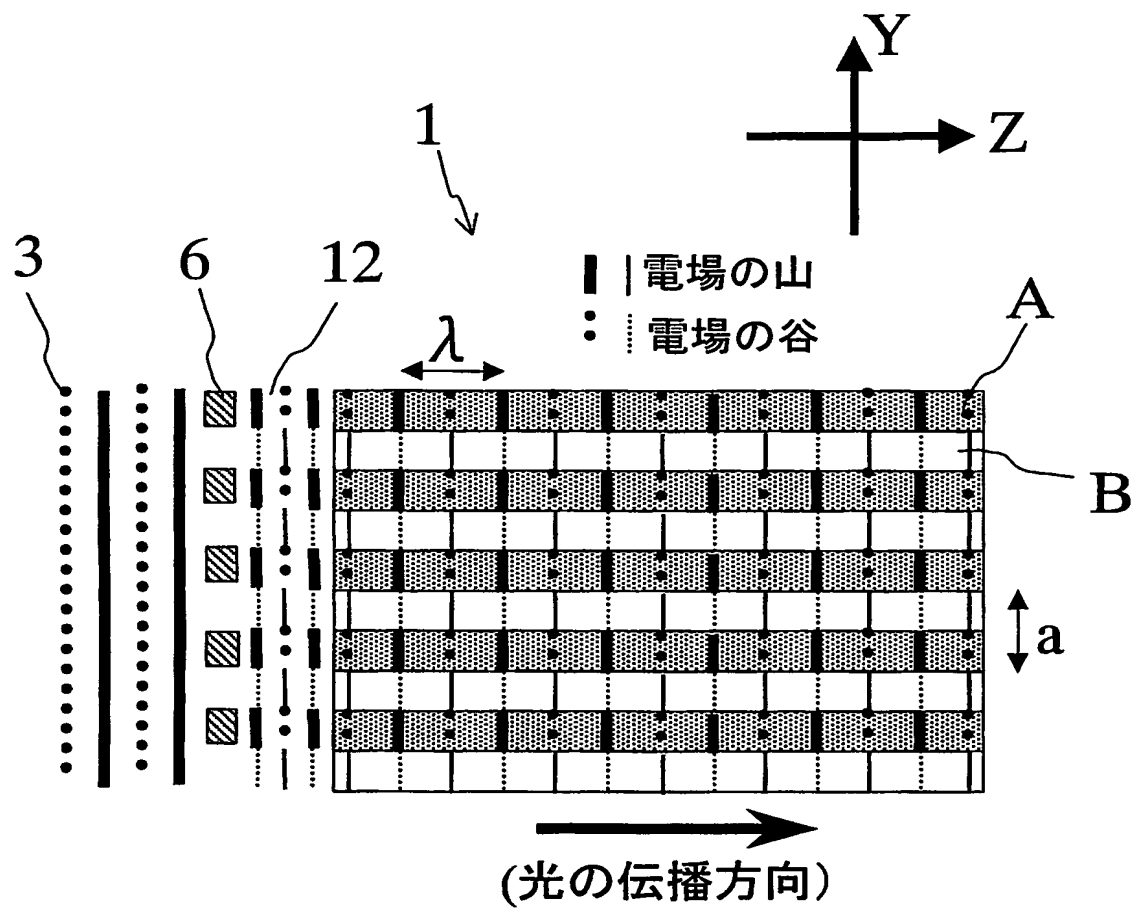
- 1 1 次元フォトニック結晶
- 2 2 次元フォトニック結晶
- 3 平面波
- 4 入射光
- 5 a、5 b 集光レンズ
- 6、6 a、6 b、2 6 a、2 6 b 位相格子
- 7 フォトニック結晶導波路
- 8 出射光
- 9 基板
- 10 フォトニック結晶光ファイバ
- 11 コア部
- 14、24 クラッド部
- 15 反射層
- 18 溝

【書類名】 図面

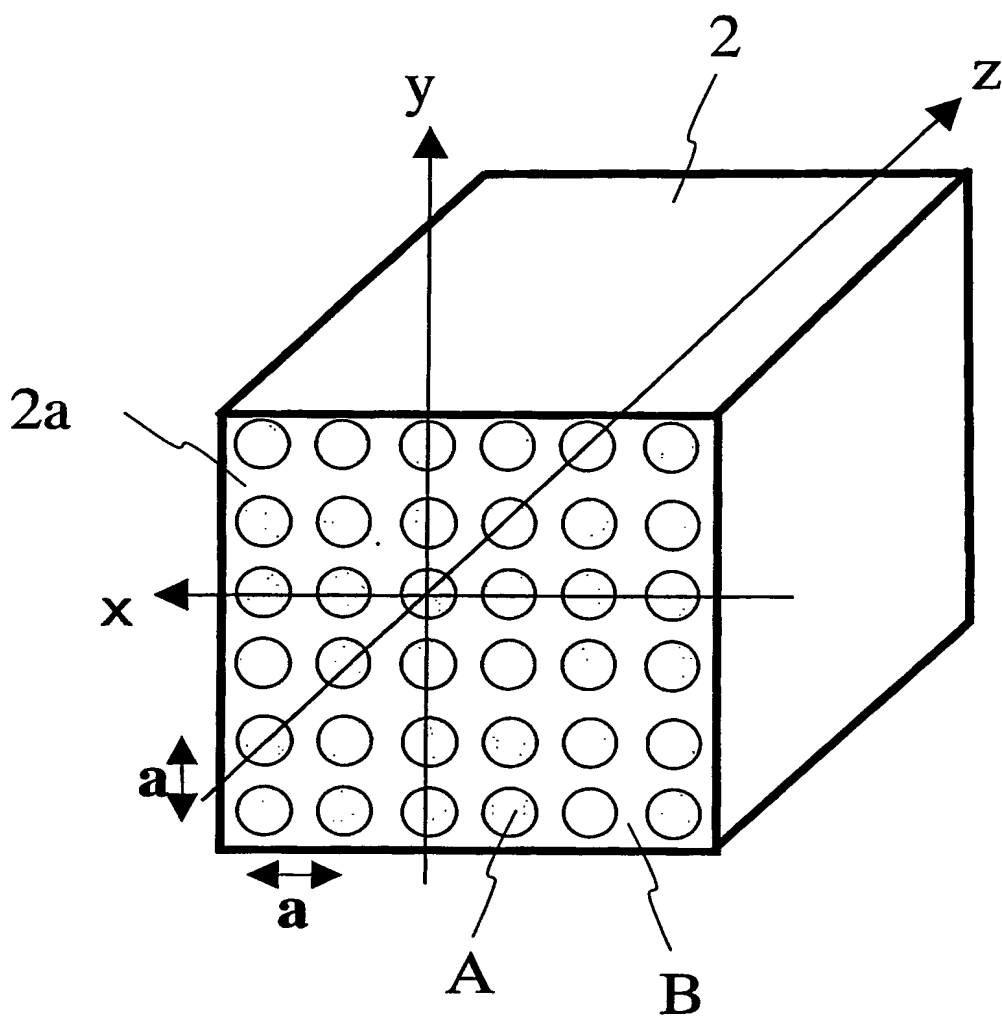
【図 1】



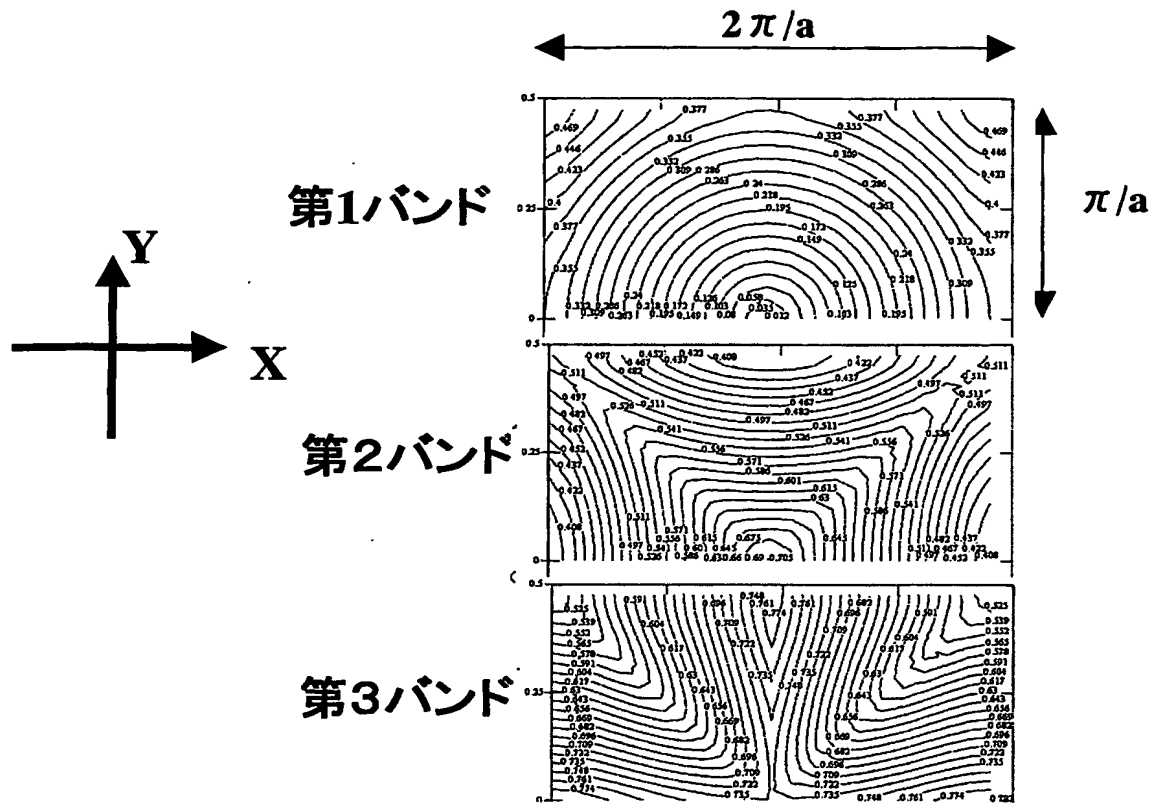
【図 2】



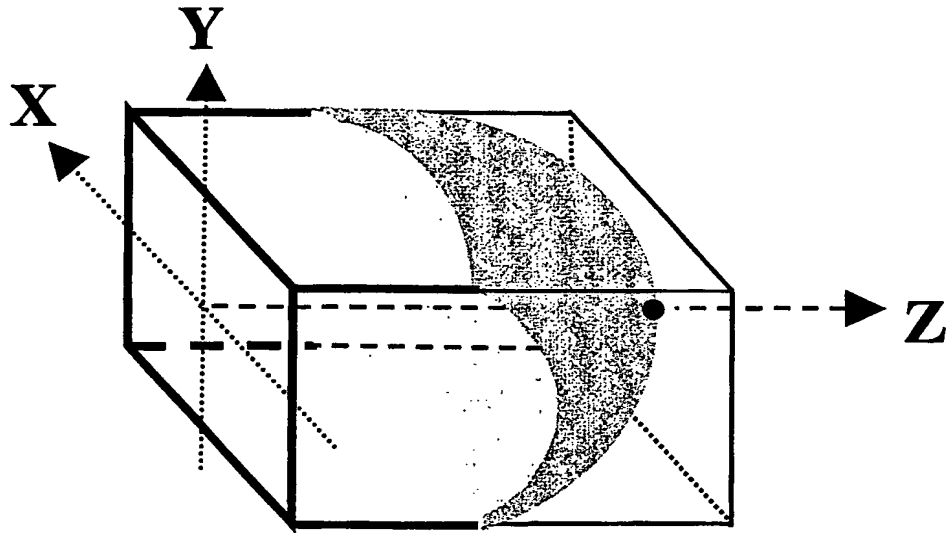
【図 3】



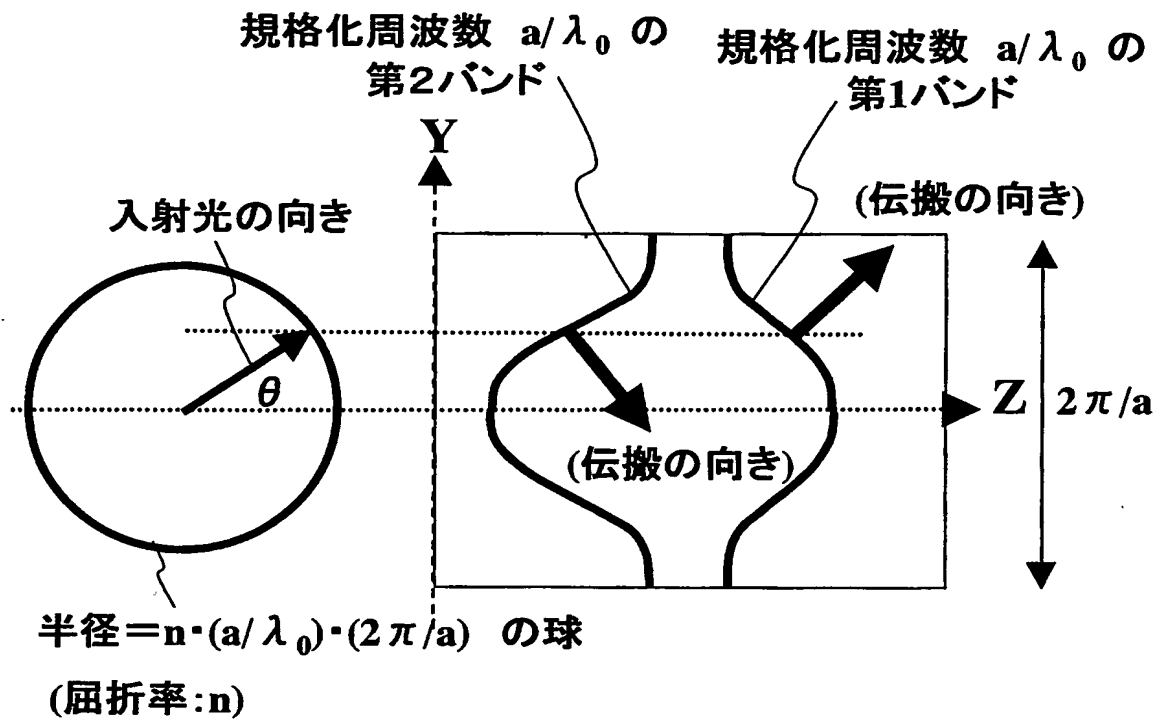
【図 4】



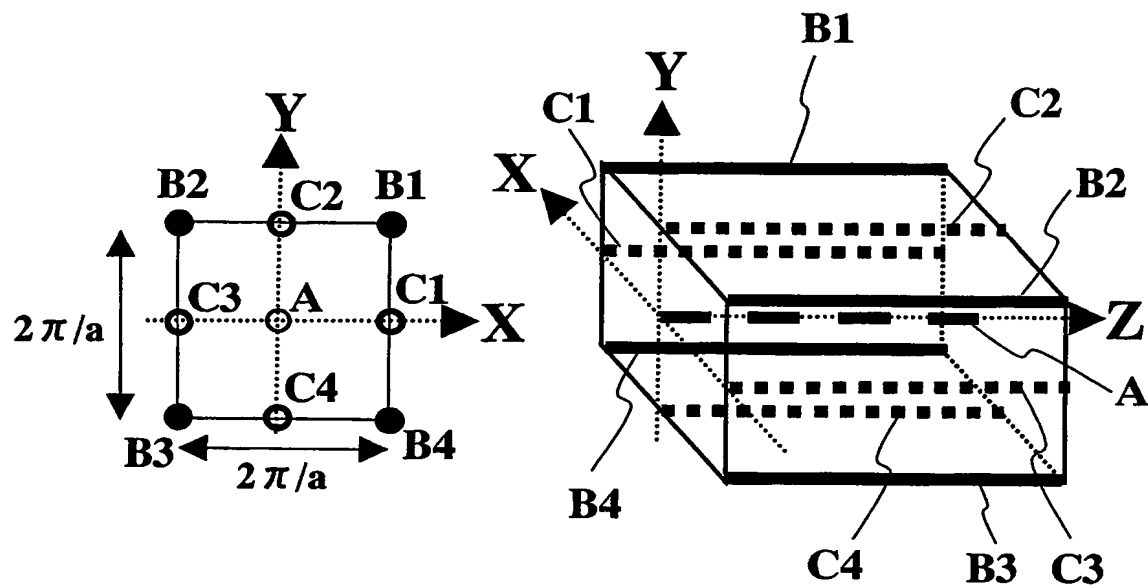
【図 5】



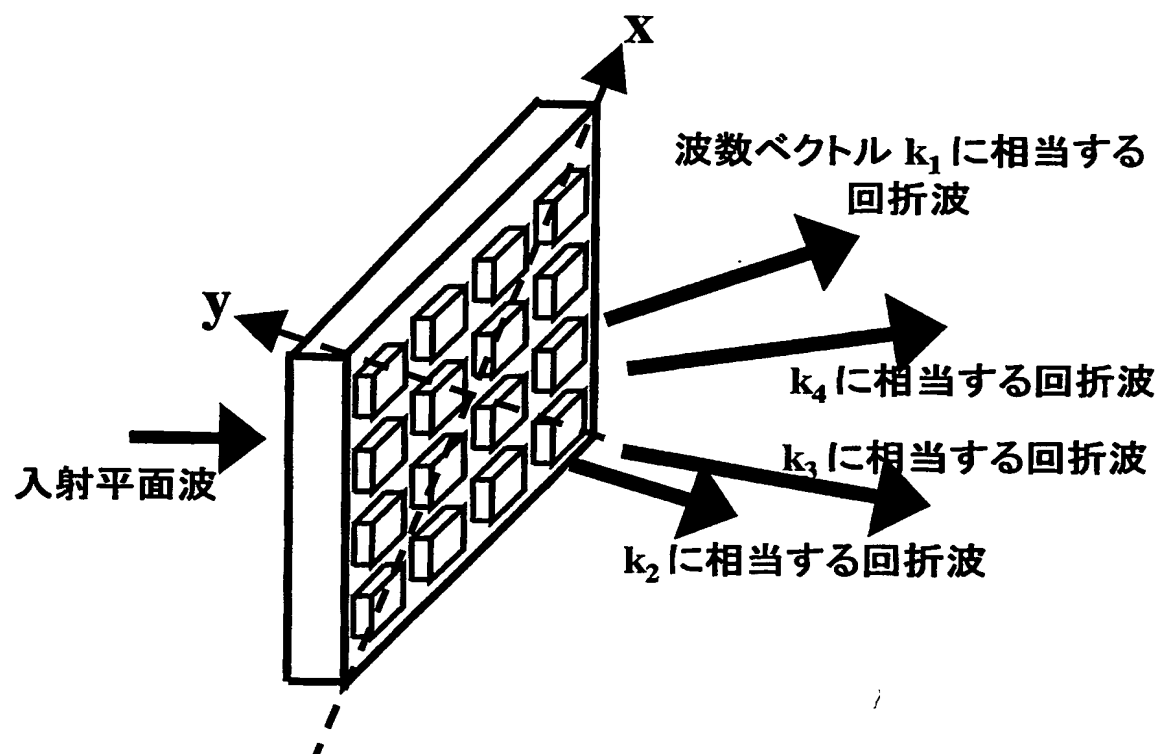
【図 6】



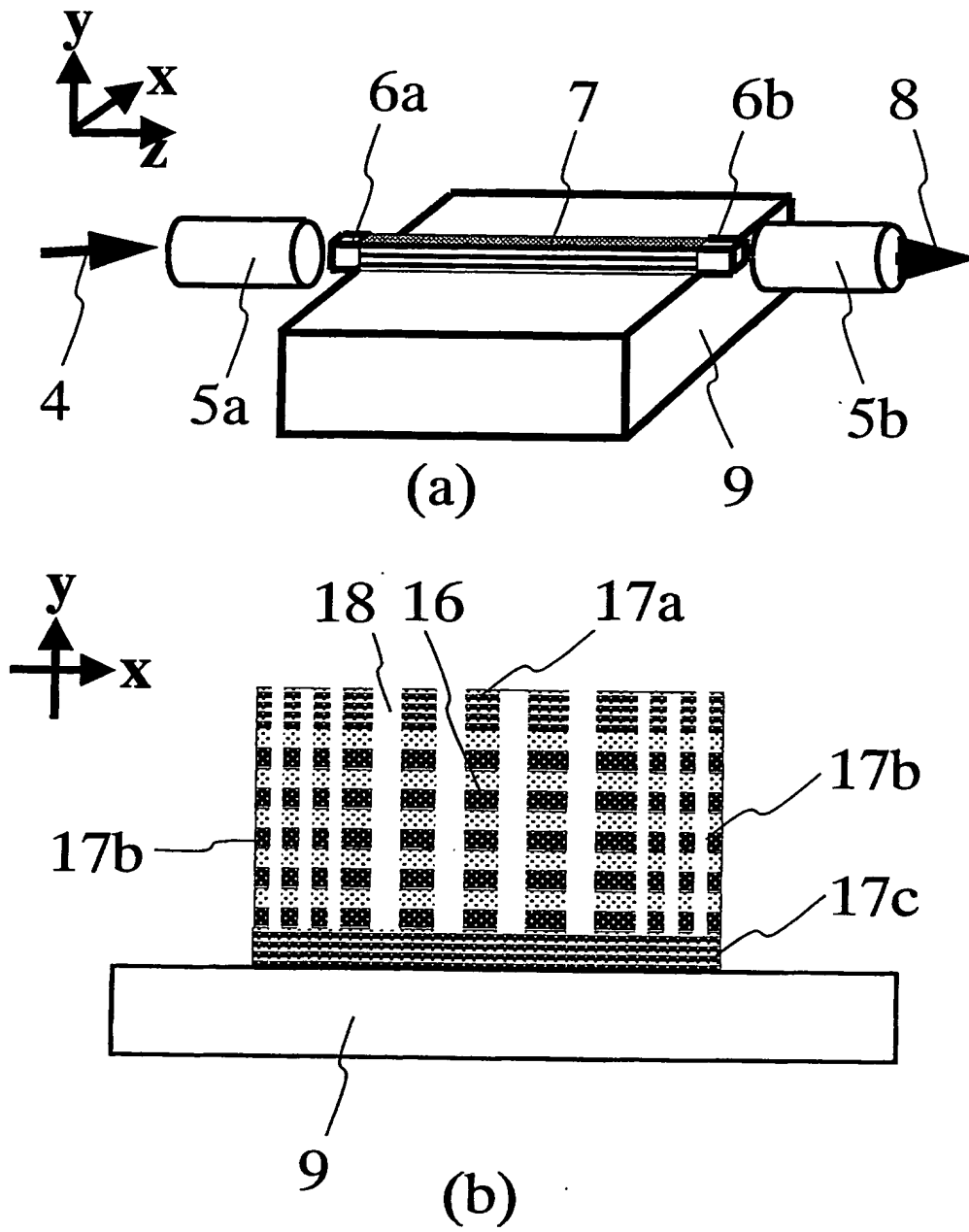
【図 7】



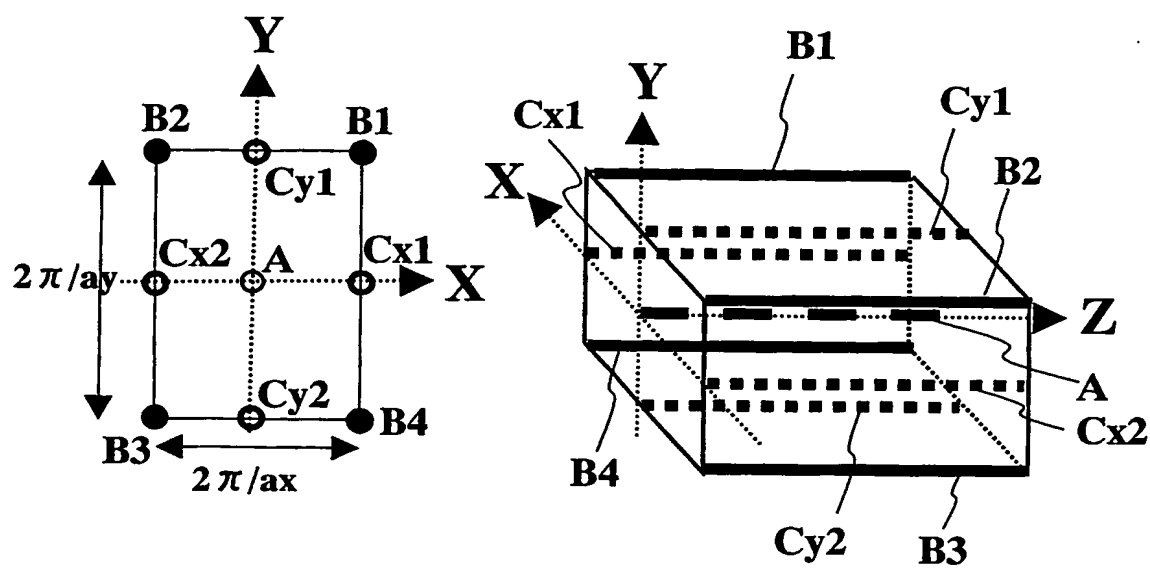
【図 8】



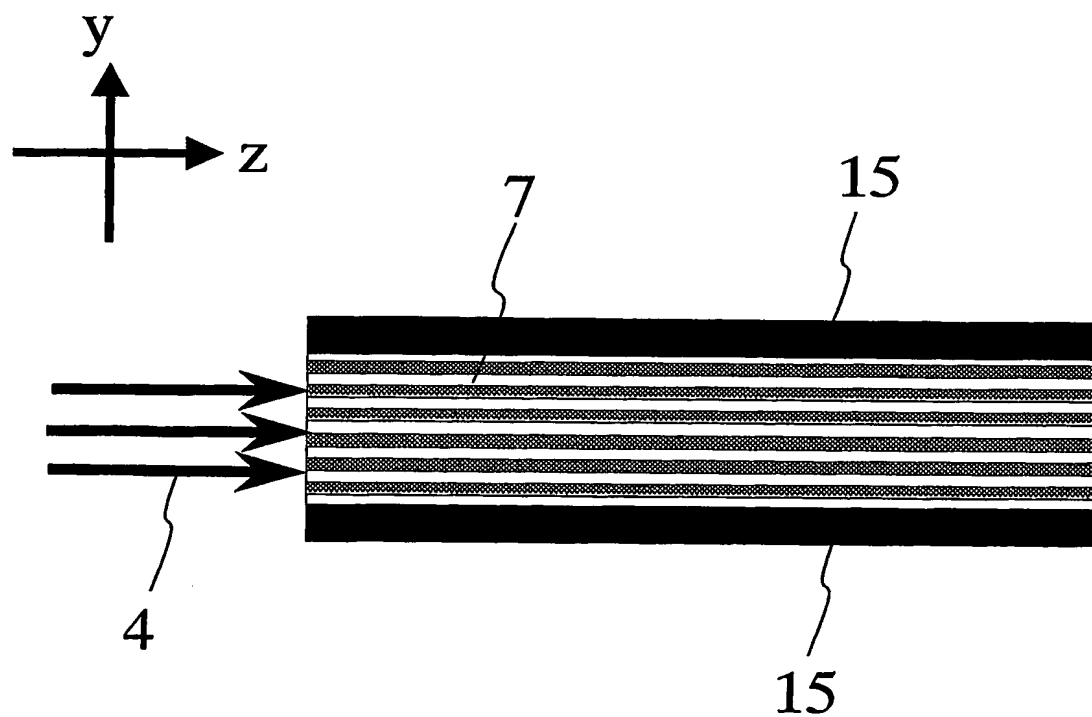
【図 9】



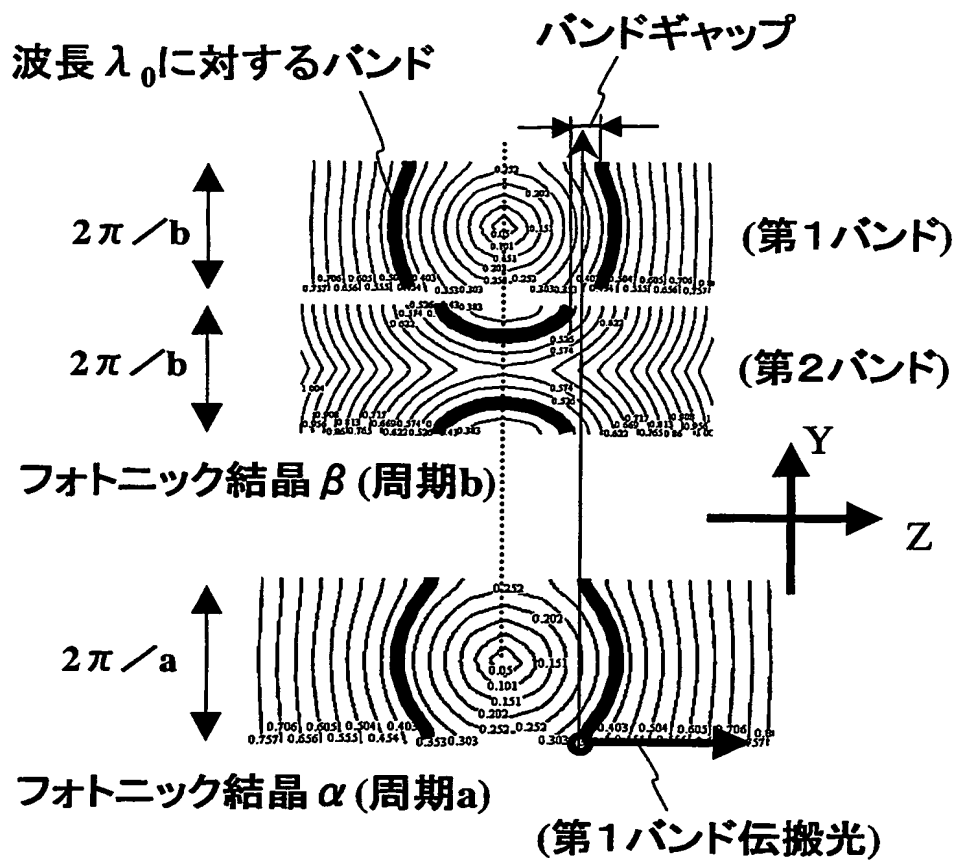
【図 10】



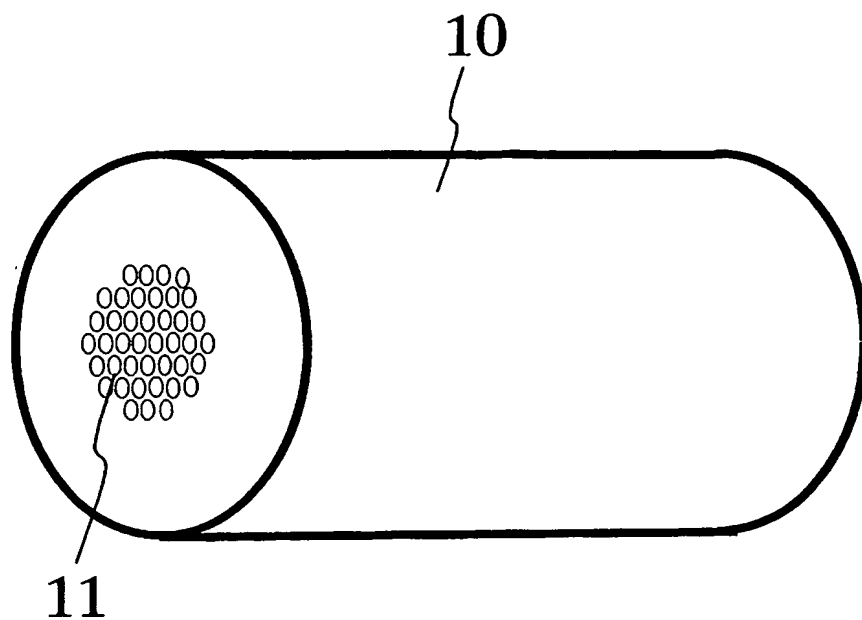
【図 11】



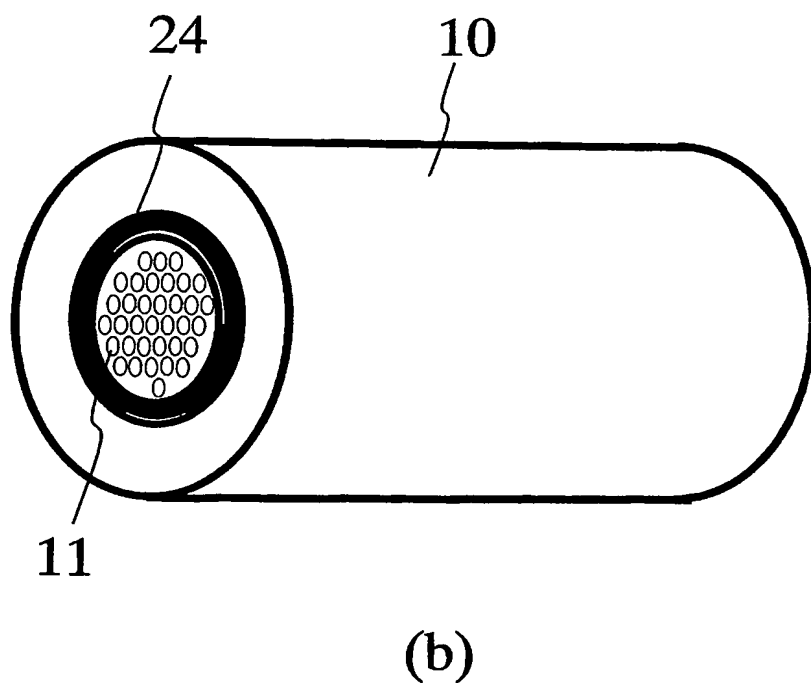
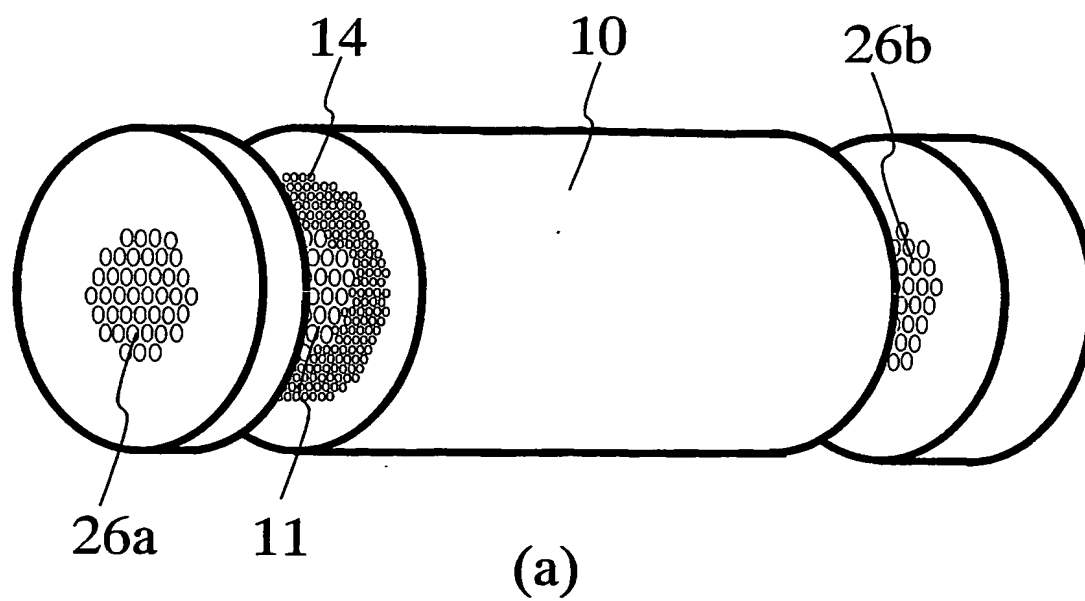
【図12】



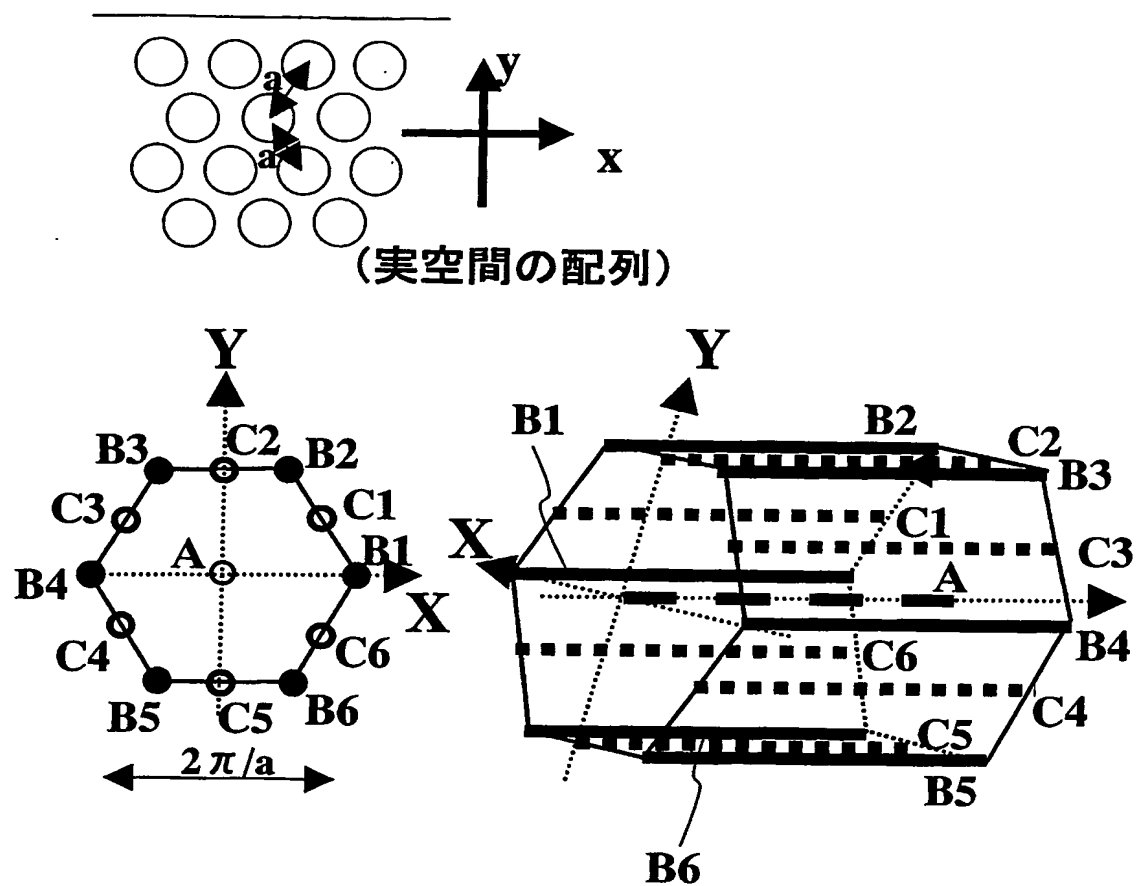
【図 13】



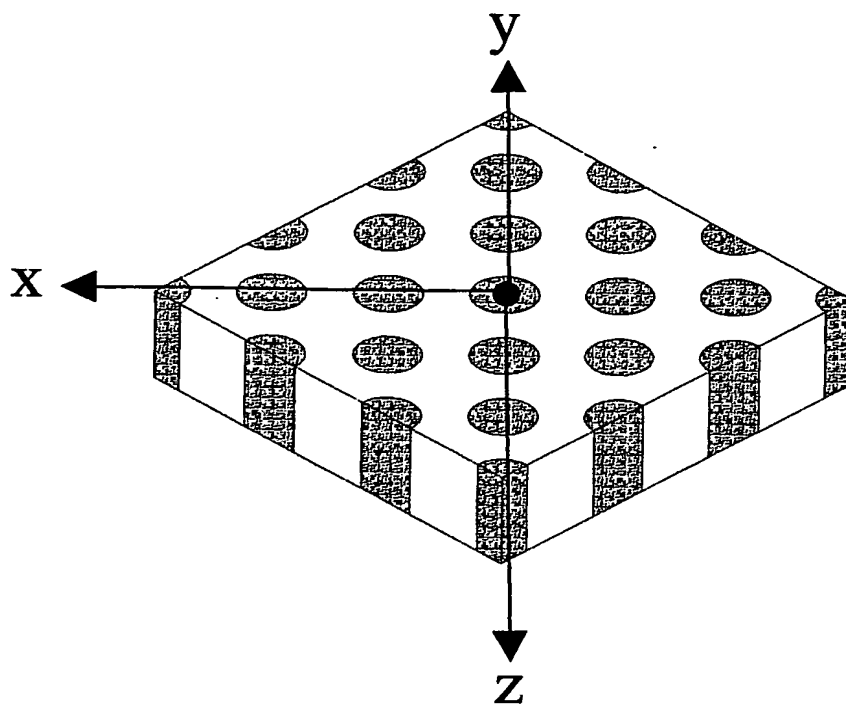
【図 14】



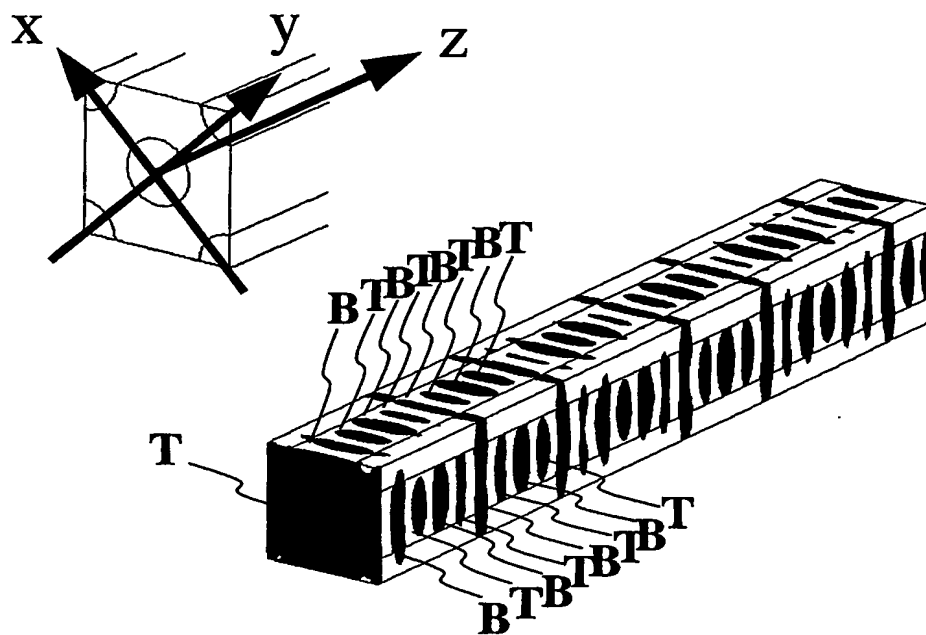
【図 15】



【図 16】



【図 18】



【書類名】 要約書**【要約】**

【課題】 第1バンド伝搬光はフォトニック結晶特有の効果がほとんどないので、高次バンド伝搬光の割合を高めることがフォトニック結晶の応用上望ましい。本発明はフォトニック結晶に特有の効果を十分に発揮するように構成された導波路素子あるいはファイバを提供することを目的とする。

【解決手段】 本発明では、2次元フォトニック結晶をコアとする導波路構造において、入射光に位相変調を加え、とくにブリルアンゾーン境界線上に存在するバンドを積極的に利用することを特徴とする。ブリルアンゾーン境界では、最低次のバンドが高次バンド伝搬光と同様な特徴を有するので、各種光学素子として利用することができる。

【選択図】 図3

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2 0 0 3 - 0 5 6 5 4 9
受付番号	5 0 3 0 0 3 4 5 9 0 9
書類名	特許願
担当官	第六担当上席 0 0 9 5
作成日	平成 1 5 年 3 月 1 2 日

< 認定情報・付加情報 >

【提出日】	平成15年 3月 4日
-------	-------------

次頁無

特願 2 0 0 3 - 0 5 6 5 4 9

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 4 0 0 8]

1. 変更年月日

2 0 0 0 年 1 2 月 1 4 日

[変更理由]

住所変更

住 所

大阪府大阪市中央区北浜四丁目 7 番 2 8 号

氏 名

日本板硝子株式会社